

绿色混凝土

LUSE HUNNENETU

姚 武 编著



化学工业出版社

材料科学与工程出版中心

绿色混凝土

姚 武 编著



化学工业出版社
材料科学与工程出版中心

· 北 京 ·

(京)新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

绿色混凝土/姚武编著. —北京: 化学工业出版社, 2005. 9

ISBN 7-5025-7661-4

I. 绿… II. 姚… III. 混凝土-无污染技术
IV. TU528

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 109381 号

绿色混凝土

姚武 编著

责任编辑: 廖叶华

文字编辑: 孙凤英

责任校对: 顾淑云

封面设计: 尹琳琳

*

化学工业出版社 出版发行
材料科学与工程出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

购书咨询: (010) 64982530

(010) 64918013

购书传真: (010) 64982630

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销
北京市昌平振南印刷厂印刷
三河市东柳装订厂装订

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 13 $\frac{3}{4}$ 字数 324 千字

2006 年 1 月第 1 版 2006 年 1 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-7661-4

定 价: 29.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

内 容 提 要

绿色混凝土是材料科学与技术的进步和社会可持续发展的必然产物，是具有环境协调性和自适应特性的先进土木工程材料。本书基于作者多年研究积累，并结合国内外最新进展，较全面地论述了绿色混凝土的发展演变、性能特点、制备工艺和应用技术。全书共分6章，内容包括绿色混凝土概述、绿色混凝土掺合料、高强高耐久性混凝土、再生骨料混凝土、环保型混凝土和机敏型混凝土等。

本书可供无机非金属材料 and 土木工程领域从事科学研究、工程设计和施工技术人员阅读参考，也可供高等院校各相关专业的师生作教材或教学参考书使用。

前 言

随着社会经济的高速发展,作为人类使用量最大的人工材料——混凝土制备和使用过程中因对资源过度开发、能源大量消耗以及造成的环境污染和生态破坏,与地球资源、地球环境容量的有限性以及地球生态系统的安全性之间的矛盾日益尖锐,迫切需要研制和使用具有可持续发展的绿色混凝土材料,以缓解和消除普通混凝土对人类自身的生存环境所构成的严重障碍和威胁。

近十年来,绿色混凝土的研究取得了长足的进展,国内外的科研成果层出不穷,工程应用的领域和范围不断扩大。从而也进一步推动了绿色混凝土的理论研究向更深、更广的层次发展。

作者在国家自然科学基金、上海市科技发展重点攻关项目、教育部科技发展重点项目以及其他省部级科研项目和工程应用项目的资助下,深入系统地开展了绿色混凝土基本理论和工程应用研究,充实并发展了绿色混凝土的概念和研究范畴。

本书将具有环境协调性和自适应特性的混凝土都纳入了绿色混凝土的研究范畴,其中环境协调性主要是指混凝土制备和使用工程中对资源和能源消耗少、大量使用工业废料、对环境负荷小、材料循环再生利用率高;环境自适应是指混凝土除了具有满意的使用性能外,还具有改善环境、适应环境(包括感知、调节和修复)、高耐久、长寿命的特性。

本书总结了作者及其指导的研究生在绿色混凝土方向的研究成果,归纳和概括了国内外近年来在这一领域的最新进展,内容丰富,资料新颖,是一部理论与实践相结合的综合性专著。

限于作者的水平,书中可能存在许多缺点和错误,诚请广大读者批评指正。

姚 武

2005年5月于同济大学

目 录

第 1 章 绿色混凝土概述	1
1.1 混凝土的组成及其发展趋势	1
1.1.1 混凝土的组成材料	1
1.1.2 混凝土的发展趋势	3
1.2 绿色混凝土的本性	6
1.2.1 可持续发展与绿色材料	6
1.2.2 混凝土的绿色化	7
1.2.3 绿色混凝土的评价体系	11
1.3 绿色混凝土的优越性	13
参考文献	14
第 2 章 绿色混凝土掺合料	17
2.1 混凝土的第六组分	17
2.1.1 粉煤灰	17
2.1.2 粒化高炉矿渣	22
2.1.3 硅灰	25
2.1.4 复合掺合料	26
2.2 掺合料的二次水化反应	30
2.2.1 二次水化反应的显微结构分析	31
2.2.2 二次水化反应的活性分析	31
2.3 掺合料的矿物减水机理	38
参考文献	43
第 3 章 高强、高耐久性混凝土	45
3.1 高强混凝土	45
3.1.1 高强混凝土的材料选择	45
3.1.2 高强混凝土的配合比设计	49
3.1.3 高强混凝土的性能	52
3.2 高耐久性混凝土	63
3.2.1 混凝土的体积稳定性	64
3.2.2 混凝土的耐久性	80
3.3 多因素状态下混凝土的耐久性	93

3.3.1 荷载作用下混凝土的渗透性	93
3.3.2 荷载作用下混凝土的抗碳化性能	93
3.3.3 荷载作用下混凝土的抗冻融性能	95
3.3.4 荷载作用下混凝土的抗氯离子侵蚀性能	95
参考文献	97

第4章 再生骨料混凝土 100

4.1 混凝土的循环利用	100
4.1.1 建筑废弃物的现状和综合利用	101
4.1.2 建筑固体废物循环利用的可行性	102
4.1.3 混凝土材料完全循环再利用	102
4.2 再生骨料及其制备技术	104
4.2.1 再生骨料的性能	105
4.2.2 再生骨料的改性处理	107
4.2.3 再生骨料的制备技术	107
4.3 再生骨料混凝土的性能及其配合比设计	110
4.3.1 再生骨料混凝土的一般性质	111
4.3.2 再生混凝土粉应用于建筑砂浆	111
4.3.3 再生骨料用于商品混凝土	113
4.3.4 再生骨料混凝土的界面特征	115
4.3.5 再生骨料混凝土的变形	118
4.3.6 再生骨料混凝土的耐久性	118
4.3.7 改善再生骨料混凝土耐久性的措施	121
4.3.8 再生骨料混凝土的配合比设计	121
4.4 再生骨料混凝土的环境评价	126
4.4.1 再生骨料混凝土的组成及LCA参数的确定	126
4.4.2 再生骨料混凝土的环境评价	129
参考文献	129

第5章 环保型混凝土 132

5.1 低碱性混凝土	132
5.1.1 多孔混凝土	133
5.1.2 植被混凝土	135
5.1.3 护坡植被混凝土	136
5.2 透水性混凝土	139
5.2.1 透水性混凝土的优点	140
5.2.2 透水性混凝土的种类	140
5.2.3 透水混凝土砖的透水性能	140
5.2.4 透水混凝土的施工方法	143

5.2.5 无砂透水混凝土的配合比设计	143
5.3 吸收分解 NO_x 的光催化混凝土	144
5.3.1 光催化 NO_x 的原理	144
5.3.2 光催化混凝土的制备	148
5.3.3 光催化混凝土净化性能计算方法及试验装置	149
5.3.4 光催化混凝土材料的应用	149
5.3.5 光催化混凝土应用中存在的问题	150
5.4 生态净水混凝土	151
5.4.1 生态混凝土的净水机理	151
5.4.2 生态净水混凝土的透水性和耐酸性	152
5.4.3 生态净水混凝土的装置	154
5.4.4 生态净水混凝土的试验及应用	155
参考文献	158
第 6 章 机敏型混凝土	160
6.1 混凝土的多功能化	160
6.1.1 自诊断机敏混凝土	160
6.1.2 自调节机敏混凝土	164
6.1.3 自修复机敏混凝土	165
6.1.4 机敏混凝土的发展趋势	166
6.2 性能自感知混凝土	167
6.2.1 机敏混凝土的导电机制	167
6.2.2 机敏混凝土的制备和电学性能测定	172
6.2.3 机敏混凝土的力-阻效应	182
6.2.4 机敏混凝土的温-阻效应	186
6.2.5 机敏混凝土的 Seebeck 效应	189
6.3 性能自调节混凝土	192
6.3.1 机敏混凝土的焦耳效应	192
6.3.2 内埋碳纤维水泥基材料的可调节混凝土结构	196
6.4 损伤自修复混凝土	200
6.4.1 混凝土损伤的自然愈合	200
6.4.2 电沉积修复混凝土裂缝	208
参考文献	212

第1章 绿色混凝土概述

1.1 混凝土的组成及其发展趋势

混凝土是目前使用量最大的土木建筑材料，它是通过胶凝材料将砂、石等颗粒状物体黏结而成的具有多种力学性能的坚硬固体。胶凝材料有气硬型和水硬型两种。其中常见的气硬型胶凝材料有石灰和石膏等；而水硬型胶凝材料主要是水泥。

通常我们所说的普通混凝土又称为水泥混凝土，它是水泥为胶结材料，以砂、石子为骨料加水拌和而成。在混凝土中，砂和石子起骨架作用；水和水泥形成水泥浆，包裹在砂石表面并填充其空隙。在硬化前，水泥浆体起润滑作用，使混凝土拌和物具有一定的流动性，便于浇注施工。水泥浆体硬化后，则将砂石胶结成一个坚实的整体。为了改善混凝土拌和物或硬化混凝土的性能，还可以在其中加入各种化学外加剂和掺合料。

1.1.1 混凝土的组成材料

1.1.1.1 水泥

水泥是组成混凝土的重要原材料。1796年，英国人派克（J. Parker）将黏土质石灰岩磨细后制成料球，在高温下煅烧，然后磨细制成水泥。派克称这种水泥为“罗马水泥”（Roman Cement），并取得了该水泥的专利权。差不多在“罗马水泥”产生的同时期，法国人采用化学成分接近现代水泥成分的泥灰岩也制造出水泥。该泥灰岩被称之为水泥灰岩，用此灰岩制成的水泥则成为天然水泥。英国人福斯特（J. Foster）将两份质量白垩和一份质量黏土混合后加水湿磨成泥浆，送入料槽沉淀，置沉淀物于大气中干燥，然后放入石灰窑内煅烧，煅烧温度以料槽中碳酸气完全挥发为准，烧成产品呈浅黄色，冷却后细磨成水泥。福斯特称该水泥为“英国水泥”（British Cement）。1824年，英国利兹城的泥水匠约瑟夫·阿斯普丁（Joseph Aspdin）通过“把石灰石捣成细粉，配合一定量黏土，掺水后以人工或机械搅和均匀成泥浆。置泥浆于盘上，加热干燥。将干料打击成块，然后装入石灰窑煅烧，烧至石灰石内碳酸气全部逸出。煅烧后的烧块再将其冷却和打碎磨细，制成水泥”，并获得英国第5022号的“波特兰水泥”专利证书，从而一举成为流芳百世的现代水泥发明人，也标志着当代建筑粮食——硅酸盐水泥就此诞生，同时踏上了不断改进的征途。

目前工业化生产的水泥原料主要由石灰质原料、黏土质原料和校正原料三部分按适当的比例配合组成。石灰质原料主要是指以碳酸钙为主的原料，如石灰石、白垩、泥灰石、贝壳以及工业废渣中的赤泥、糖滤泥等。它是水泥熟料中氧化钙的主要来源，是水泥生产中使用量最多的一种原料。黏土质原料系指碱和碱土金属的铝硅酸盐。主要化学成分是 SiO_2 、 Al_2O_3 和 Fe_2O_3 ，主要是为熟料提高酸性氧化物。校正原料是考虑到水泥生产中只用石灰质和黏土质两种原料往往不能满足熟料对于化学成分的要求，而选用铁质、硅质或

铝质等进行校正的原料。

水泥的生产工艺过程可概括为“两磨一烧”，即将配合好的原材料在磨机中磨成生料，然后将生料入窑煅烧成熟料。熟料配以适量的石膏，或根据水泥品种组成要求掺入混合材，入磨机磨至适当细度，便制成水泥成品。

配制混凝土时，通常根据工程性质、部位、施工条件、环境状况等，合理选择水泥品种。目前我国常用的水泥品种有：硅酸盐水泥、普通硅酸盐水泥、矿渣硅酸盐水泥、火山灰质硅酸盐水泥、粉煤灰硅酸盐水泥和复合硅酸盐水泥等六大品种。

1.1.1.2 骨料

混凝土所用骨料按粒径大小分为两种，其中粒径大于 5mm 的称为粗骨料；粒径小于 5mm 的称为细骨料。粗骨料通常有碎石和卵石两种，细骨料一般是由天然岩石长期风化等自然条件形成的天然砂。

骨料在混凝土中所占体积约为 60%~80%。由于骨料不参与水泥复杂的水化反应，因此，过去通常将之视为一种惰性填充料。随着混凝土技术的不断深入研究和发 展，人们逐渐意识到骨料对混凝土许多重要性能如强度、体积稳定性以及耐久性等都会产生相当的影响，甚至起着决定性的作用。美国的 P. K. Mehta 教授曾指出：“将骨料作为一种惰性填充料这种传统的见解，确实应该被打上一个问号。如果不像对待水泥那样来重视骨料，显然是不适当的”^[1]。

1.1.1.3 混凝土用水

混凝土用水的基本原则是：不影响混凝土的凝结和硬化；无损于混凝土强度发展及耐久性；不加快钢筋腐蚀；不引起预应力钢筋脆断；不污染混凝土表面。一般而言，凡能饮用的水和清洁的天然水，都适用于制作混凝土。

1.1.1.4 化学外加剂

化学外加剂，又称为混凝土的第五组分，是混凝土在搅拌时加入的组分，目的是赋予新拌混凝土和硬化混凝土指定的优良性能，如提高混凝土的抗冻性、调节凝结和硬化、改善工作性、提高强度和耐久性等。系统地研究化学外加剂是随着 20 世纪 30 年代引气剂的使用开始的。目前，在北美、欧洲、日本等发达国家，约 80% 的混凝土都含有一种或几种外加剂。我国现有的化学外加剂品种也十分繁多，按其主要功能可分为五类：①改善新拌混凝土工作性的外加剂，如普通减水剂、高效减水剂、早强减水剂、缓凝减水剂、引气减水剂、泵送剂等。②调节混凝土凝结硬化性能的外加剂，如早强剂、缓凝剂、速凝剂等。③调节混凝土气体含量的外加剂，如引气剂、加气剂、泡沫剂、消泡剂等。④改善混凝土耐久性的外加剂，如阻锈剂、防冻剂等。⑤为混凝土提供特殊性能的外加剂，如防水剂、膨胀剂等。

1.1.1.5 掺合料

在制备混凝土时，为了节约水泥、改善混凝土的性能、调节混凝土强度等级而加入的天然或人造的矿物材料，统称为混凝土掺合料。掺合料可分为活性掺合料和非活性掺合料两大类。非活性掺合料一般与水泥组分不起化学作用，或化学作用很小，如磨细石英砂、石灰石、硬矿渣等材料。活性掺合料虽然本身遇水不会硬化或硬化速度缓慢，但能与水泥水化生成的氢氧化钙发生化学反应，生成具有水硬性的胶凝材料。如粒化高炉矿渣、

火山灰质材料、粉煤灰、硅灰等。

1.1.2 混凝土的发展趋势

20 世纪 20 年代以前,混凝土的抗压强度普遍低于 20MPa。受当时科学技术水平的限制,制造高强度等级的混凝土成为人们的一种奢望,同时人们还得忍受低强度等级的混凝土所伴随的低耐久性问题的长期困扰。1936 年,法国的 E. Freyssinet 在成功研制出预应力混凝土结构后,率先提出希望用 100MPa 的混凝土来设计和制造预应力混凝土结构,以替代钢结构的设想。

1.1.2.1 高强混凝土

随着世界各国在发展预应力混凝土结构的同时,混凝土技术也在飞速发展,强度等级得到不断提高。20 世纪 50 年代,世界各国的混凝土平均抗压强度已超过 30MPa。到 20 世纪 70 年代晚期,由于减水剂和高活性掺合料得到开发和应用,使高强混凝土的制备技术进入了一个新的阶段。采用普通的混凝土施工工艺,已能较容易地配制出 80MPa 以上的高强混凝土。而现阶段,在一些主要城市地区,具有 100~130MPa 抗压强度的混凝土是常规使用的混凝土。

高强混凝土是由于建筑工程的不断需求和现代材料科学发展的结果,同时高强混凝土也提供了重要的工程和经济方面的优势。用较高强度的材料可以减小结构的截面尺寸。最早的高强混凝土的商业应用包含了其在高层建筑柱结构中的使用。抗压强度的提高允许柱横截面大幅度地减少,这就提供了更多的可用房屋面积。高强混凝土的这个重要优点导致从结构型钢到钢筋混凝土,整个结构的设计都发生了变化。随着时间的推移,高强混凝土已具有一个更为广阔的应用前景,包括其在建筑物剪力墙和承重墙中的应用,以及在桥梁的箱梁中的应用,尤其是大跨度桥梁,其边缘厚度是由混凝土强度控制的。

美国是较早研制和使用高强混凝土的国家,比较著名的以高强混凝土砌筑的建筑物有^[2]:芝加哥的水塔大厦(Water Tower Place,最大抗压强度达 98MPa),南威克街 311 大厦(311 South Wacker Drive,采用了 100MPa 的高强混凝土)和联合广场(Two Union Square,混凝土抗压强度达 140MPa)等。其中南威克街 311 大厦在 20 世纪 80 年代是世界最高的钢筋混凝土建筑物(高度达 295m),混凝土采用了泵送现浇。其他如大跨度的 East Huntington, W. V. 桥也是采用高强混凝土浇注的另一杰作。

1.1.2.2 高性能混凝土

随着现代工程结构的高度和跨度不断增加,使用的环境条件日益严酷,工程建设对混凝土耐久性的要求愈来愈高,为了适应工程建设的发展,人们又研究和开发了高性能混凝土。

高性能混凝土的研究始于 20 世纪 80 年代末期,当时是为了解决混凝土材料抗氯离子的渗透问题,以防止因钢筋锈蚀而导致混凝土结构性能的严重劣化。自 20 世纪 90 年代初期,加拿大矿物与能源技术中心(CANMET)开始的高性能混凝土试验研究及美国混凝土协会(ACI)和美国国家标准与技术研究院(NIST)领导的高性能混凝土研究工作和组织的一系列国际会议之后^[3~11],才真正在全世界范围内掀起高性能混凝土材料的研究热潮。

尽管时至今日各国学者对高性能混凝土的要求和含义不尽相同,不同国家、不同学者依照各自的认识、实践、应用范围和目的要求的差异,对高性能混凝土有不同的定义和解

释,但高性能混凝土的共性可归结为:①在新拌阶段具有高工作性,不需振捣就能完善浇注;②在水化、硬化早期和服役过程中具有高体积稳定性,很少产生由于水化热或干缩等因素而形成的裂缝;③在硬化后具有足够的强度和低渗透性,满足工程所需的力学性能和耐久性。

从以上高性能混凝土的共性不难看出,高耐久性是高性能混凝土的最终目标,高工作性、高体积稳定性、低渗透性和良好的力学性能是高性能混凝土从浇注、硬化到正常服役等不同阶段的具体表现。

纵观近十几年来来的研究成果,制备高性能混凝土的技术途径基本上是采用在普通混凝土四种基本组分(水泥、水、细骨料和粗骨料)基础上复合超塑化剂(高效减水剂)和活性掺合料的方法^[10]。目前所见的技术文献,尚未能提供可进行高性能混凝土配合比设计的具体方法,当前只能按照工程结构设计与施工的要求进行试配,并按优化的配合比做一些必要的较长期的验证试验。

配制高性能混凝土时掺入超塑化剂是为了使其具有合适的工作性,而活性细掺合料作为第六组分,是配制高性能混凝土必不可少的^[12~16]。这除了可起到增宽粒径范围的作用外,由于这些活性细掺合料均具有相当的火山灰活性,从而提高混凝土的密实性,对提高强度及后期强度的发展也十分有利,而且有些活性细掺合料还具有辅助减水效果,可减少混凝土的用水量或有利于改善混凝土的工作性。高性能混凝土的配制原则是将水灰比与基材密实度两个要素结合起来的,因此,在高性能混凝土配合比设计中,宜采用水灰比和水胶比 $[\text{水}/(\text{水泥}+\text{活性细掺合料})]$ 两个参数来控制并表征高性能混凝土的性能,水灰比与水胶比对高性能混凝土各有其用途和意义。

混凝土可视为由硬化水泥浆体与骨料二者组成的两相复合材料。骨料是非连续相,而水泥浆体是骨料的胶结材料。高性能混凝土不仅要具备一定的高强度,而且还应具备高密实性和高体积稳定性,这些性能都取决于胶结材与骨料之比和该两相材料各自的质量。通常情况下,干燥的、级配良好的粗、细骨料混合体的空隙率约为21%~22%,要配制密实的混凝土,这些空隙就需由胶结材填充。但考虑到施工工作性的需要,水泥浆体体积至少应占25%,为使相互存在着一定制约关系的强度、工作性和体积稳定性能达到最佳的均衡,水泥浆体体积以25%~30%为宜^[17]。

高性能混凝土的微观结构方面有以下一些特点:①由于存在大量未水化的水泥颗粒,浆体所占比例降低,这些未水化的水泥颗粒可视为硬化混凝土中的微骨料;②浆体的总空隙率小;③孔径尺寸较小,仅最小的孔为水饱和;④浆体-骨料界面与浆体本体无明显区别,消除了普通混凝土中传统的薄弱区;⑤游离氧化钙含量低;⑥自身收缩造成混凝土内部产生自应力状态,导致骨料受到强力的约束。

高性能混凝土虽然在诸多性能上比普通混凝土优越,但它仍不是完善的混凝土或理想的混凝土,其最为突出的弱点是自收缩大和脆性增大。研究表明,高性能混凝土的自收缩占总收缩的50%以上,而且即使在100%的相对湿度下养护仍会发生^[18,19]。高性能混凝土自收缩大的原因是由于水泥浆体内部含水率随水胶比的降低而下降,即使原来的水分不向环境散失,混凝土内部的水也会因水化的消耗而减少,这样试件表层的水分向内部迁移。因高性能混凝土的微观结构较为密实,这种水分的迁移非常困难。当孔隙水的迁移速率低于因化学收缩而导致毛细孔的形成速率时,内部含水率自发地降低,使毛细孔趋于不

饱和状态,发生自干燥现象,引起毛细孔压力大幅增大而产生强烈的自收缩。日本学者研究发现水胶比为 0.20 的硅粉混凝土 2d 的自收缩值竟可达 500×10^{-6} 。另外,随着高性能混凝土强度的提高,其脆性显著加剧已被大量实验室研究和工程实践所证明,高强混凝土的破坏往往呈无征兆的爆炸性破坏^[20,21],这对大型复杂的混凝土结构而言,无疑增添了许多不安全的因素。高强导致高脆的缺陷大大限制了高性能混凝土的广泛应用。

高性能混凝土脆性增大源于高性能混凝土微观结构的改变。由于在水泥浆体中存在两类独立的孔隙^[22]:一种为无长度但有体积的开放孔;另一类为无体积但有长度的封闭孔。前一种孔影响混凝土的抗压强度和弹性模量,而后者则决定断裂应力,如抗拉强度或弯曲强度。高性能混凝土采用了较小的水胶比并使用了高效减水剂,大幅度减少了开放孔,提高了弹性模量和抗压强度;但却对类似裂纹的封闭孔影响甚微,即对抗拉强度的贡献有限,因而导致拉压比的下降。另外,高性能混凝土中水泥浆体和界面过渡区的强度因水胶比的减小和胶凝材料总量的增加而显著提高,相对而言,粗骨料成了混凝土中的薄弱相。通过试件破坏后的断面图像和 SEM 微观形貌分析可以发现^[23],高性能混凝土的断面较平整,大量粗骨料剪断或拉断,在宏观力学行为上呈现剧烈的脆性破坏特征。

为降低高性能混凝土的脆性,国内外尝试通过优选高强坚韧的粗骨料,诱导裂纹的扩展沿界面呈阶梯状偏转与分化,提高混凝土的韧性和延性^[24,25]。研究表明,以铁矿石替代 25%~75% 的粗骨料,抗压强度提高了约 5%,而抗拉强度则提高了 20% 以上,断裂能提高了 80%。而且从微观形态上分析,铁矿石替代部分粗骨料后,断裂面的粗糙度明显增大,表明断裂韧性显著提高。

1.1.2.3 绿色混凝土

随着社会生产力和经济高速发展,材料生产和使用过程中资源过度开发和废弃及其造成的环境污染和生态破坏,与地球资源、地球环境容量的有限性以及地球生态系统的安全性之间出现尖锐的矛盾,对社会经济的可持续发展和人类自身的生存构成严重的障碍和威胁。因此,认识资源、环境与材料的关系,开展绿色材料及其相关理论的研究,从而实现材料科学与技术的可持续发展,是历史发展的必然,也是材料科学的进步。在这样的背景下,具有环境协调性和自适应特性的绿色混凝土应运而生。

绿色混凝土的环境协调性是指对资源和能源消耗少、对环境污染小和循环再生利用率高。绿色混凝土的自适应性是指具有满意的使用性能,能够改善环境,具有感知、调节和修复等机敏特性。

绿色混凝土作为绿色建材的一个分支,自 20 世纪 90 年代以来,国内外科技工作者开展了广泛深入的研究。其涉及的研究范围包括:绿色高性能混凝土、再生骨料混凝土、环保型混凝土和机敏混凝土等。

吴中伟院士较早提出绿色高性能混凝土(GHPC)的概念^[26,27]。GHPC 具有的特征主要包括:①更多地节约熟料水泥,减少环境污染;②更多地掺加以工业废渣为主的活性细掺料;③更大地发挥高性能优势,减少水泥和混凝土的用量。

再生骨料混凝土^[28],是指用废混凝土、废砖块、废砂浆作骨料,与水泥砂浆拌和而制得的混凝土。

环保型混凝土^[29]则是指能够改善、美化环境,对人类与自然的协调具有积极作用的混凝土材料。这类混凝土的研究和开发刚起步,它标志着人类在处理混凝土材料与环境的

关系过程中采取了更加积极、主动的态度。目前所研究和开发的品种主要有透水、排水性混凝土,绿化植被混凝土和净水混凝土等。

机敏混凝土是指具有感知、调节和修复等功能的混凝土^[30~33],它是通过在传统的混凝土组分中复合特殊的功能组分而制备的具有本征机敏特性的混凝土。机敏混凝土是信息科学与材料科学相结合的产物,其目标不仅仅是将混凝土作为具有优良力学性能的建筑材料,而且更注重混凝土与自然的融合和适应性。

1.2 绿色混凝土的本性

1.2.1 可持续发展与绿色材料

材料在人类社会的发展中起着极为重要的作用,它是人类社会进步的物质基础。新材料是新技术发展的必要物质基础,也是技术革命的先导。在社会发展的进程中,材料的进步带来了社会的变革。但是,发展迄今,传统的材料已经不适应社会发展的进程,传统的材料从设计制造、使用到最后废弃的过程中,因为大量生产、大量废弃,造成资源枯竭、能源短缺、环境污染、生态破坏等一系列问题。

1987年联合国环境与发展委员会发表《我们共同的未来》,1988年第一届国际材料联合会(UMRS)提出了“绿色材料(Green Materials)”的概念,即“在原料采取、产品制造、使用或者再循环以及废料处理等环节中对地球环境负荷最小和有利于人类健康的材料”。1990年日本东京大学的山本良一教授在材料研究中提出了“环境材料”的概念^[34],1992年在巴西的里约热内卢召开了联合国环境与发展大会,从此,人类社会进入了“保护自然,崇尚自然,促进持续发展”为核心的绿色时代。材料、环境及社会可持续发展的关系,在全球范围内得到空前的关注。1993年8月31日至9月4日,国际材料联合会在东京召开了“第三届先进材料国际会议”,会上对环境问题特别重视,环境材料分会成为最大的分会,该会场的主题是:环境意识材料(Environment Conscious Materials)。1994年3月,我国政府通过了《中国21世纪议程》——中国21世纪人口、环境与发展白皮书,明确指出:“人口剧增、资源过度消耗、环境污染、生态破坏和南北差距扩大日益突出,成为全球性的重大问题,严重阻碍着经济的发展和人民生活质量的提高,继而威胁着全人类的未来和发展”。“制定和实施《中国21世纪议程》,走可持续发展之路是中国在未来和下一世纪发展的自然需要和必然选择”。并将“生产绿色产品、大力推广清洁生产工艺技术”、“努力实现废弃物产出最小化和资源再生化、节约能源、提高效率”作为重点内容。1996年8月,我国编制的《“S-863计划纲要研究”新材料及制备技术领域研究报告》中明确提出我国应积极研究、发展生态建材的建议,并起草了“S-863计划纲要新材料及制备技术领域——生态建材计划纲要”。1998年5月,科技部、国家自然科学基金委员会和国家863计划新材料专家组联合召开了“生态环境材料研究战略研讨会”,将“材料环境协调性评价技术及应用”研究课题列入国家“九五”863计划,其中包括水泥、涂料、铝材、塑料门窗、陶瓷等建筑材料的环境协调性评价研究。

绿色材料的特点包括材料本身的先进性(优质的、生产能耗低的材料);生产过程的安全性(低噪声、无污染);材料使用的合理性(节省的、可以回收的)以及符合现代工程学的要求等。绿色材料是材料发展的必然。绿色浪潮在全球掀起后,人们绿色意识得到

增强：开发自然、造福人类是我们的责任，然而在利用自然的同时，保护自然、节约能源和原材料更是我们的义务。

绿色材料的研究与应用对可持续发展战略的实施影响重大。虽然目前的工作还主要局限在材料的回收和重复利用技术、减少“三废”的材料技术与工艺、减少环境污染的代用材料、环境净化材料、可降解材料等方面，但随着环境意识的加强，在研究和应用材料时，考虑环境因素已是必然趋势，绿色材料制造的绿色产品时代也将随之到来。

1.2.2 混凝土的绿色化

绿色混凝土的特点：①降低水泥用量，大量利用工业废料；②比传统混凝土材料有良好的力学性能和耐久性；③具有与自然环境的协调性，减轻对环境的负荷，实现非再生性资源的可循环使用，节省能源，以及有害物质的“零排放”；④能够为人类提供温和、舒适、便捷和安全的生存环境。

1.2.2.1 大量利用工业废料，降低水泥用量

水泥是混凝土的主要胶凝材料，而水泥工业环境污染严重，不仅产出大量粉尘，还排放有害气体，如 CO₂、NO 和 SO₂ 以及其他有毒物质。其中 CO₂ 的大量排放将导致地球温室效应加剧。通常情况下，每生产 1t 水泥熟料约排放 1t CO₂。我国是水泥生产大国，2003 年全国水泥产量达到 8.13 亿吨，占全球水泥产量的 43%。水泥产量高速增长的背后是人类生存环境的恶化。如何既满足混凝土质量和数量的同时，又降低混凝土中的水泥用量，达到减少温室气体排放和粉尘污染的效果，是摆在人们目前的一个严峻而又挑战性的课题。在长期的研究和实践中，人们发现许多工业废渣，如粉煤灰、粒化高炉矿渣、煤矸石、硅灰等具有潜在的化学活性，可以部分替代水泥，并且可以制备性能更优越的混凝土。这样，不仅节约了矿山资源，降低了水泥生产总能耗，而且也有利于改善和保护自然环境。利用工业废渣作混凝土中的活性矿物掺合料是实现混凝土绿色化的一个重要途径。我国工业废渣数量庞大，仅粉煤灰每年将产出近 2 亿吨，而煤矸石目前堆放总量已超过 30 亿吨。活性矿物掺合料作为廉价的辅助胶凝材料却赋予混凝土许多优良的性能，如提高强度、密实度和工作性，改善混凝土微观结构，降低孔隙率，增强对腐蚀介质的抵抗力，延长混凝土的耐久性等。表 1-1 为磨细高炉矿渣对混凝土性能的影响^[35]，图 1-1 为粉煤灰掺量对混凝土工作性能的影响^[36]。从中可以看出，在一定掺量范围内，活性矿物掺合料可以显著提高混凝土的强度和工作性。表 1-2 的结果^[37]显示，掺入硅灰后，混凝土的抗腐蚀耐久性大幅度提高。

表 1-1 掺入比表面积为 8000cm²/g 的磨细矿渣掺合料对混凝土性能的影响

编号	单位水泥 用量 /kg	掺合料 掺量/%	坍落度 /mm	坍落度经时保留值 /mm				抗压强度 /MPa		劈拉强度 /MPa	
			0min	30min	60min	90min	7d	28d	7d	28d	
C-1	560	0	65	40	10	0	59.4	69.5	5.3	6.3	
S-1	448	20	200	170	150	130	65.8	73.4	6.2	7.1	
S-2	392	30	210	195	180	160	70.6	76.6	6.3	7.3	
S-3	336	40	230	220	200	185	69.9	80.4	6.7	7.4	
S-4	280	50	235	210	195	180	71.6	84.1	6.2	7.4	
S-5	224	60	230	215	200	180	70.5	82.2	5.9	6.9	

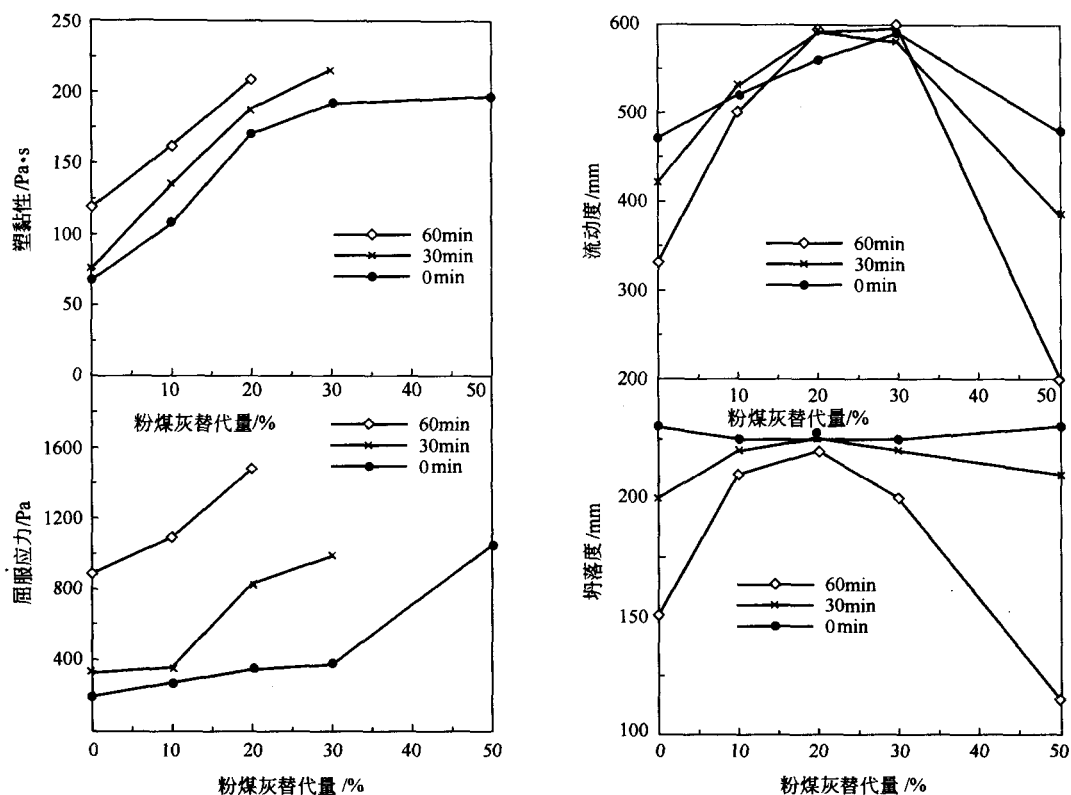


图 1-1 粉煤灰掺量对混凝土工作性能的影响

表 1-2 在酸溶液中浸泡 300d 混凝土单位长度的收缩率 (W/C=0.5)

试件批号	硅灰掺量/%	硝 酸 溶 液		醋 酸 溶 液	
		收缩值/mm	收缩率/%	收缩值/mm	收缩率/%
21	0	3.15	12.8	0.70	7.0
22	5	2.90	12.2	0.63	5.6
23	10	2.68	11.8	0.50	4.9
24	30	1.63	8.6	0.30	3.2

大量使用以工业废渣为原料的活性掺合料，可以在保持水泥熟料总量不变的前提下满足经济快速增长对混凝土的需求，节约资源能源，保护环境，发挥重大的经济效益和社会效益。

1.2.2.2 提高混凝土综合性能

提高混凝土强度、工作性和耐久性也是混凝土绿色化的途径之一。混凝土强度的提高，可以减小建筑结构的截面积或结构体积，减少混凝土用量，从而节约水泥、砂、石等混凝土原材料的用量。工作性能的提高，一方面有助于提高混凝土的密实性，另一方面可以减少振捣器的使用，降低环境噪声。提高混凝土的耐久性，可以延长结构物的使用寿命，进一步节约维修和重建费用，减少对自然资源无节制的消耗。

近年来，混凝土耐久性成为人们的热门话题。人们已逐渐认识并接受了混凝土耐久性对节约资源能源、保护环境的意义。延长混凝土工程寿命还可以节约大量资金，这方面发

达国家深有体会。根据美国的统计,其混凝土基础工程(公路、桥梁、大坝、供水系统等)估计价值达 60000 亿美元,而每年用于维修和重建费用则高达 3000 亿美元。目前,我国正处于基础建设的高潮,若不吸取教训,重视提高工程寿命,同样将重蹈覆辙,在未来若干年内付出高昂的维修和重建费用并制约进一步发展。当前,国内外许多学者都主张延长混凝土工程的设计寿命,如桥梁使用寿命按 100~125 年来设计,港口工程寿命按 100 年设计等。

1.2.2.3 使用再生骨料和人造骨料

混凝土制备过程还将消耗大量砂石。若以每吨水泥生产混凝土时消耗 6~10t 砂石材料计,我国每年将生产砂石材料(48~80)亿吨。全球已面临优质砂石材料短缺的问题,我国不少城市亦将远距离运送砂石材料。同时,我国每年拆除的建筑垃圾产生的废弃混凝土约为 1360 万吨,新建房屋产生的废弃混凝土约为 4000 万吨,大部分是送到废料堆积场堆埋。因此实现再生骨料的循环利用对保护环境,节约能源、资源意义是十分显著的。

废弃混凝土加工的骨料取决于其洁净度和坚实度,这与其来源和加工技术有关。利用预制场和预拌混凝土搅拌站剩余混凝土加工的骨料通常比较干净;来源于拆除的路面或水工结构的废弃混凝土,需筛分去除粉粒。许多实验室和现场研究表明:废弃混凝土相当于粗骨料的颗粒可以用来替代天然骨料,进行比较试验的结果是前者作为骨料配制的混凝土抗压强度和弹性模量至少是后者的 2/3。拆除建筑物时的废弃混凝土比较难处理,因为常混有其他杂物。与拆除时的分选相结合,这类废弃物可以分门别类地回收和再生,效果较好。

德国、荷兰、比利时等国废弃物再生率已达 50% 以上。德国钢筋混凝土委员会 1998 年 8 月提出了“在混凝土中采用再生骨料的应用指南”,日本制定了《再生骨料和再生混凝土使用规范》,并相继在各地建立了以处理混凝土废弃物为主的再生加工厂。2000 年要求混凝土的资源再利用率达到 90% 以上。日本对再生混凝土的吸水性、强度、配合比、收缩、抗冻性进行了系统的研究。

再生骨料的性质同天然砂石骨料相比因其含有 30% 左右的硬化水泥砂浆,从而导致其吸水性能、表面密度等物理性质与天然骨料不同。再生骨料表面粗糙、棱角较多,并且骨料表面还包括着相当数量的水泥砂浆(水泥砂浆空隙率大、吸水率高),再加上混凝土块在解体、破碎过程中,由于损伤积累使再生骨料内部存在大量微裂缝,这些因素都使再生骨料的吸水率和吸水速率增大,这对配制再生混凝土是不利的。同样由于骨料表面水泥砂浆的存在,使再生骨料的密度和表观密度比普通骨料低。再生混凝土的抗拉强度、抗弯强度、抗剪强度和弹性模量通常较低,而徐变和收缩率却是较高的。各种性能的差异程度取决于再生骨料所占的比重、原混凝土特征、污染物质的数量和性质、细粒骨材料和附着砂浆的数量。研究之目的在于测定这些因素的最佳组合,以便经济地生产适合于某种用途的再生骨料混凝土。含有再生骨料的混凝土耐久性,也受上述各种因素的影响。然而最直接的因素就是污染物质的存在。

因价格费用的原因,由废弃物加工成人造骨料,往往要比天然骨料价格贵,但这种状况很快将改变,因为天然骨料来源日趋短缺,而人造骨料的加工技术逐渐完善和高效。

近年来,日本已经开发利用城市下水道污泥生产骨料的技术,这种骨料其强度达到了普通河砂砂浆的 90%,很有利用前景。除此之外,还有粉煤灰陶粒、黏土页岩陶粒等人